

钢管微张力减径过程中壁厚变化的有限元计算分析和实验研究

冀文生¹, 郝润元¹, 袁伟瑾¹, 田晓虹¹, 杜凤山², 于 辉²

(1. 太原重型机械(集团)有限公司设计研究院, 山西 太原 030024; 2. 燕山大学, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 通过弹塑性有限元对几个典型品种钢管微张力减径过程中的壁厚变化作了计算分析, 并与实验结果进行对照, 证明用弹塑性有限元分析微张力减径过程是可行的, 并得出一些结论, 这对于用有限元手段开发新品种, 推广微张力减径技术有重要的意义。

关键词: 钢管; 微张力减径; 壁厚; 有限元计算分析; 实验研究

中图分类号: TC335; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-2311(2001)01-0015-06

Finite - element Analysis and Experimental Research of In - process Gage Variation of Steel Tube Being Slight - stretch Reduced

Ji Wen - sheng¹, Hao Run - yuan¹, Yuan Wei - jin¹, Tian Xiao - hong¹, Du Feng - shan², Yu Hui²

(1. The Design Institute, Taiyuan Heavy - duty Machinery (Group) Co., Ltd., Taiyuan 030024, China;

2. Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Computing analysis of the in - process gage variations of several representative types of steel tubes being slight - stretch reduced via elastoplasticity finite elements is conducted, and comparison of the analysis with the experiment results made, showing that it is practical to analyze the steel tube slight - stretch reduction process with elastoplasticity element. The work done will greatly contribute to developing new product with FE method and disseminating the steel tube slight - stretch reduction technique

Key words: Steel tube; Slight - stretch reduction; Gage; Finite element analysis; Experimental research

0 引 言

对于钢管生产,除了内外表面质量外,最重要的就是钢管的壁厚均匀度。引起壁厚不均的原因很多,但工艺参数是主要原因之一。由于对壁厚不均的研究分析理论不是十分成熟,国内不少工厂在很多情况下都以正公差进行生产,因此钢管的实际重量常超过理论重量,使金属消耗大大增加。由于微张力减径是热轧的最后一个环节,所以它直接决定钢管成品的直径公差,并对壁厚公差起关键作用。为了能更准确地了解钢管的微张力减径过程,采用仿真计算与实验条件趋同的方法,着重对 TZ355 微张力减径机组几个典型品

种进行了分析和研究。

TZ355 微张力减径机组是太原重机厂消化吸收国外先进技术为鞍钢无缝钢管厂和上海钢管厂设计制造的,包括了工艺设计和设备设计。在工艺设计中,用解析法成功地设计了厚壁、中厚壁、薄壁管的全部工艺参数,并据此生产出了合格的产品,满足了用户的要求。但由于解析法的局限,无法对减径过程中各种因数(尤其是张力)在通过每一机架后其壁厚变化做定量的计算分析,从而无法提供最优参数与之匹配,并影响到新品种的开发和机组能力的发掘。为此本文采用有限元分析 TZ355 微张力减径机组实验品种的张力减径过程,以进一步了解和掌握钢管的微张力减径的关键工艺。文中的有限元计算是在燕山大学杜凤山教授开发的 EPFEP3 大变形弹塑性有限元程序上进行的。

冀文生(1968 -),男,山西平遥人,工学硕士,高级工程师,主要从事张力减径工艺和设备的研究。

1 有限元计算的边界条件和工艺参数

计算的边界条件和工艺参数如下：

轧辊直径 355mm

机架间距 325mm

机架数 7

轧辊数 3×7

轧辊材料 无限冷硬球墨铸铁

轧辊角位移增量 $\Delta\alpha = 0.01091\text{rad}$

摩擦层厚度 0.1mm

屈服函数 $y = 50 + 300\ln(\epsilon_p + 1)\text{MPa}$

摩擦系数 0.4

单元 八节点六面体等参元

节点数量 $26 \times 48 = 1248$

轧制温度 950°C

荒管尺寸 $\Phi 108\text{mm} \times 15\text{mm}$, $\Phi 108\text{mm} \times 5\text{mm}$,
 $\Phi 108\text{mm} \times 5.5\text{mm}$

荒管材质 20 钢

通过对比研究,确定张力采用斜梯形分布,用三维解析法编制程序对通过每一机架的前后张力进行计算,然后平均分配到每一节点上。每一节点上的张力列于表 1,设计孔型参数列于表 2,实际孔型参数列于表 3。

表 1 张力分配情况/ $\text{N} \cdot (\text{每节点})^{-1}$

规格/mm	平均张力系数	机架序号						
		1	2	3	4	5	6	7
$\Phi 108 \times 15$	0.268	120	260	320	250	180	90	0
	0.134	60	130	160	125	90	45	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Phi 108 \times 5$	0.268	45	120	180	135	127	83	0
	0.179	30	80	120	90	85	55	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Phi 108 \times 5.5$	0	0	0	0	0	0	0	0

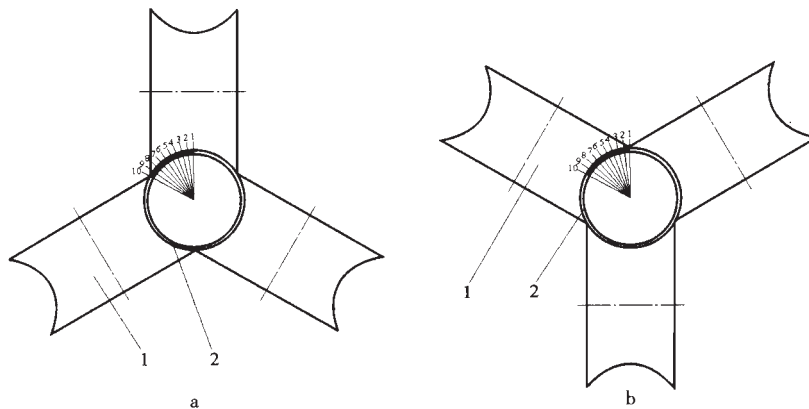


图 1 有限元计算的分析点示意

1—轧辊 2—钢管(涂黑部分为所研究钢管的 1/6) a—机架 1, 3, 5, 7 的轧辊布置 b—机架 2, 4, 6 的轧辊布置

表 2 设计孔型参数

机架序号	半长轴 a/mm	半短轴 b/mm	刀具直径 /mm	距离 /mm	椭圆度
1	53.218	51.218	108.966	27.063	1.032 5
2	51.585	49.927	105.710	27.174	1.033 2
3	49.977	48.389	102.414	26.829	1.032 8
4	48.418	46.898	99.222	26.482	1.032 4
5	46.909	45.453	96.128	26.133	1.032 0
6	45.749	44.894	92.827	20.018	1.019 1
7	44.950	44.950	89.900	0	1.000 0

表 3 实际孔型参数

机架序号	2a/mm	2b/mm	机架序号	2a/mm	2b/mm
1	合乎样板	合乎样板	5	93.35	90.80
2	合乎样板	99.830	6	90.30	89.80
3	99.50	96.760	7	90.16	89.80
4	96.50	93.745			

2 有限元计算结果的处理和分析

我们将有限元计算的各节点的信息直接与 AutoCAD 接口,可得到轧件的三维变形图,经处理可得到完整的稳态变形图。取第十五层截面作为研究对象,可得到各品种通过各机架的稳态变形图 46 个。

考虑到 3 辊孔型轧辊的对称性,我们把轧件的六分之一作为研究对象,横向取均匀的 10 点作计算分析(见图 1)。根据机架轧辊的布置,点 1 通过机架 1 时为轧辊孔型底部,通过机架 2 时为轧辊辊缝处,……,通过机架 7 时为轧辊孔型底部。对于点 10 则相反,通过机架 1 时为轧辊辊缝处,通过机架 2 时为轧辊孔型底部,……,通过机架 7 时为轧辊辊缝处。表 4 列出了 3 个轧制品种在不同张力情况下通过每一机架后 10 点的壁厚变化。

表 4 轧件通过各机架后 10 点的壁厚变化及偏差值

规格/mm	平均张力系数	项目	机架序号						
			1	2	3	4	5	6	7
Φ108 × 15	0	1	15.222	15.427	15.452	15.713	15.835	15.890	15.913
		2	0.066 8	0.112 3	0.253 9	0.278 0	0.354 4	0.357 7	0.327 9
	0.134	1	15.208	15.398	15.528	15.513	15.715	15.811	15.807
		2	0.025 2	0.101 8	0.127 1	0.215 7	0.129 3	0.074 5	0.068 2
	0.268	1	15.198	15.245	15.253	15.209	15.294	15.356	
		2	0.088 0	0.042 1	0.095 8	0.203 0	0.206 6	0.189 1	
Φ108 × 5	0	1	5.129	5.184	5.382	5.388	5.517	5.577	
		2	0.053 1	0.152 0	0.314 0	0.153 3	0.171 6	0.157 8	
	0.179	1	5.087	5.178	5.288	5.243	5.260	5.250	5.255
		2	0.027 5	0.059 0	0.056 1	0.086 9	0.077 9	0.088 2	0.084 8
	0.268	1	5.125	5.196	5.263	5.249	5.220	5.192	
		2	0.044 5	0.066 2	0.050 9	0.044 4	0.049 1	0.045 7	
Φ108 × 5.5	0	1	5.593	5.730	5.839	5.919	6.070	6.141	6.145
		2	0.074 5	0.037 9	0.083 0	0.059 6	0.114 1	0.143 5	0.128 3

注：项目中，1—10 点平均值/mm；2—偏差/mm。

我们把 Φ108mm × 15mm 的钢管 ($D/S = 7.2$ ，属厚壁管) 分别在 3 种张力情况下通过各机架的 10 个点，其横向、纵向壁厚变化列表进行对比分析，可以看出：在无张力时，靠近轧辊孔型底部和辊缝的点在轧制过程中壁厚波动幅度较大，通过轧辊孔型底部时减壁明显，通过轧辊辊缝时增壁明显，在远离孔型底部和辊缝的点则表现为平缓增壁。在中张力时，10 个点壁厚变化的幅度明显减小，但还存在明显的减壁增壁过程。在施加了大张力之后，壁厚在每一点的延伸趋势变化平缓，波动幅度小于上述两种情况。在前张力继续加大时，第 1 机架壁厚变化的增加值较大，而后面几个机架壁厚变化较稳定且在轧辊辊缝处增壁，在孔型底部处减壁。

综合以上的各种数据和分析，可以得出厚壁管在椭圆孔型中微张力减径的一些规律：

(1) 在只有前张力或只有后张力的情况下，钢管横断面的壁厚变化随着张力的增加而增加，壁厚波动幅度加剧。这与实际应用中的情况相吻合，即张力的增加和减小不能太快，否则壁厚变

化太剧烈，会影响钢管质量。

(2) 从钢管的纵向延伸上看，随着张力的增加，壁厚变化趋于平缓且幅度递减，有利于提高钢管质量。因此，在允许的微张力情况下，尽量用较大的张力。

(3) 在有前后张力的情况下，随着张力的增加，横向的壁厚偏差均比无张力时有所改善，但随着张力增加到某一数值时，横向壁厚偏差出现拐点，有加大的趋势，这说明较大的张力对横向和纵向的影响是不相同的，在具体品种时应综合考虑，以便提高钢管质量。

(4) 轧件在孔型中部的点在没有张力减径时无论其壁厚最薄或最厚，而经微张力减径后是壁厚最厚的地方，这也是张力减径产生内六角的基本原因，由于微张力减径的减径率较小，机架轧制次数较少，因此虽有内六角的可能，但一般不发生。

(5) 随着张力的增加，单机架的延伸率也逐渐增加且比较平稳，这有助于提高钢管的质量。

以 Φ108mm × 5mm 钢管 ($D/S = 21.6$ ，属薄壁管) 作代表来分析薄壁管在减径过程中的壁厚变

化。由表 4 可以看出：钢管在辊缝和孔型底部的六点的减壁增壁作用明显小于上述中厚壁管，相反在中厚壁管变化较稳定的孔型中部却出现了显著的增壁减壁作用，这反映了钢管的 D/S 对于无张力减径时壁厚的变化起着关键作用。

在薄壁管的减径过程中，随着张力的逐渐增加，无论纵向还是横向，壁厚的变化幅度越来越小，变化规律更加稳定。

综合各种数据和分析，可以得出薄壁管在椭圆孔型中张力减径的规律，除了与厚壁管相同的 5 点之外，还有以下 3 点：

(1) 随着张力的增加，横向壁厚的分布也明显趋于均匀，波动幅度也越来越小，因此，薄壁管在大张力情况下对壁厚分布不均的改善优于厚壁管。

(2) 薄壁管在无张力状态下的壁厚变化与厚壁管的壁厚变化有明显差别。

(3) 随着张力的增加，单机架的延伸率也逐渐增加且比较平稳，增加的幅度明显大于厚壁管，这就说明用微张力轧制薄壁管较厚壁管能提高延伸率。

对于 $\Phi 108\text{mm} \times 5.5\text{mm}$ 钢管 ($D/S = 19.6$)，我们仅计算分析了它在无张力状态下的减径过程。在孔型底部和辊缝处其增壁减壁作用明显地大于 $\Phi 108\text{mm} \times 5\text{mm}$ 钢管，小于 $\Phi 108\text{mm} \times 15\text{mm}$ 钢管；在孔型中部壁厚的波动幅度明显大于 $\Phi 108\text{mm} \times 15\text{mm}$ 钢管，小于 $\Phi 108\text{mm} \times 5\text{mm}$ 钢管。其壁厚偏差大于 $\Phi 108\text{mm} \times 5\text{mm}$ 钢管，小于 $\Phi 108\text{mm} \times 15\text{mm}$ 钢管，这说明随着 D/S 的增大，减径的壁厚不均也在加剧。

3 实验数据分析

我们对 4 个轧制品种进行了实验，边界条件与有限元计算时相同。

3.1 壁厚偏差平均值的对比分析

经过数据整理和计算，4 个品种的荒管、成品管的壁厚偏差平均值(包括头部和尾部)如下：

(1) 15 支 $\Phi 108\text{mm} \times 5\text{mm}$ 荒管的壁厚偏差平均值为 0.2069mm (平均张力系数 0.197)，轧后 14 支成品管(1 支轧卡)的壁厚偏差平均值为 0.1608mm ，减径后较减径前的平均偏差值减小了 22% 。

(2) 15 支 $\Phi 108\text{mm} \times 5.5\text{mm}$ 荒管的壁厚偏差平均值为 0.22497mm (平均张力系数 0.02)，15 支成品管的壁厚偏差平均值为 0.2765mm ，减径后较减

径前的平均偏差值增大了 22.9% 。

(3) 5 支 45 钢 $\Phi 108\text{mm} \times 15\text{mm}$ 荒管的壁厚偏差平均值为 0.5017mm (平均张力系数 0.268)，5 支成品管的壁厚偏差平均值为 0.361mm ，减径后较减径前的平均偏差值减小了 28% 。

(4) 5 支 20 钢 $\Phi 108\text{mm} \times 15\text{mm}$ 荒管的壁厚偏差平均值为 0.633mm (平均张力系数 0.268)，4 支成品管(1 支轧卡)的壁厚偏差平均值为 0.362mm ，减径后较减径前的平均偏差值减小了 43% 。

从以上可以看出，壁厚偏差的变化规律与我们用有限元计算分析的非常接近，即微张力减径比无张力减径有利于壁厚不均的改善。

3.2 实验结果分析

3.2.1 $\Phi 108\text{mm} \times 5\text{mm}$ 钢管

为了更准确地了解壁厚的变化规律，我们对取样钢管(12 号)和轧卡的钢管分别进行了测量，具体尺寸如下。

12 号钢管：荒管头部和尾部的壁厚平均值和偏差分别为 5.20 ± 0.272 ， $5.69 \pm 0.156\text{mm}$ ，通过微张力减径并切头后，头部和尾部的壁厚平均值和偏差分别为 5.40 ± 0.112 ， $5.65 \pm 0.148\text{mm}$ 。取样两段共 4 个断面，其壁厚平均值和偏差分别为 5.63 ± 0.206 ， 5.97 ± 0.245 ， 6.11 ± 0.160 ， $5.72 \pm 0.238\text{mm}$ ，从头尾两端看，壁厚公差得以改善。

轧卡的钢管：由于是在生产过程中自然轧卡，所以无法判断是在哪一个机架发生的。又由于轧卡时间较长，钢管在每一机架上反复拉伸或墩粗，因此无法反映其应有的壁厚，但它能放大反映壁厚偏差。我们把轧卡的钢管切成 8 段，第 1 段对应第 1 机架，第 2 段对应第 2 机架，……，第 7 段对应第 7 机架，第 8 段对应成品管。每一段有 2 个断面，分为入口和出口。入口段的壁厚偏差分别为 0.136 ， 0.144 ， 0.155 ， 0.207 ， 0.156 ， 0.265 ， 0.380 ， 0.180mm ；出口段的壁厚偏差分别为 0.186 ， 0.132 ， 0.191 ， 0.188 ， 0.179 ， 0.1465 ， 0.362 ， 0.178mm ；而我们在上一节有限元计算的结果为 0.0275 ， 0.0590 ， 0.0561 ， 0.0869 ， 0.0779 ， 0.0882 及 0.0848mm 。

把上述 3 组数据对比一下(见图 2)，可以看出，有限元计算的结果与入口段实测的最大值和最小值出现在同一位置，而且增大和减小趋势在每一段都是一致的，因此可以认为入口段实测值与有限元计算值的趋势基本吻合。

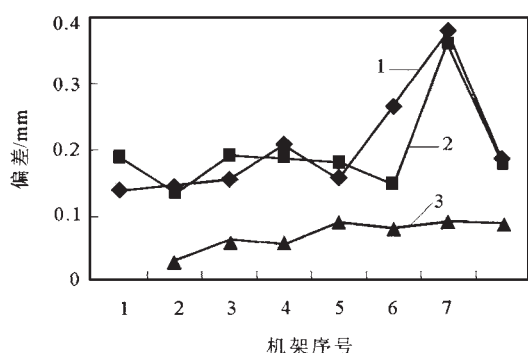


图2 入口、出口段实测及有限元计算的壁厚偏差对比
1—入口段实测值 2—出口段实测值 3—有限元计算值

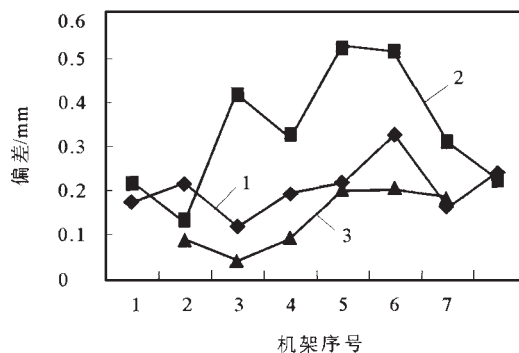


图3 入口段实测值、出口段实测值及有限元计算结果对比
1—入口段实测值 2—出口段实测值 3—有限元计算值

3.2.2 Φ108mm × 5.5mm 钢管

我们取样测量了该规格 2 根钢管(9 号和 15 号)。

9 号钢管：荒管的壁厚平均值及偏差头部为 $5.56 \pm 0.181\text{mm}$ ，尾部 $5.97 \pm 0.09\text{mm}$ ，壁厚平均值为 5.76mm ，偏差平均值 0.136mm 。成品管的头部取 7 段样，尾部取 6 段样。头部的壁厚平均值及偏差平均值分别为 6.30mm 及 0.173mm ；尾部的壁厚平均值及偏差平均值分别为 6.35mm 及 0.133mm 。

15 号钢管：荒管的尺寸非常接近有限元计算的初始条件，我们以此验证计算结果。荒管壁厚平均值头部为 5.42mm ，尾部 5.56mm ，平均值为 5.49mm 。成品管切为 4 段，共 8 个断面，壁厚平均值分别为 $5.83, 6.44, 6.34, 5.96, 6.29, 6.07, 6.42, 5.89\text{mm}$ ，总平均值为 6.155mm 。这与我们用有限元计算的结果 6.145mm 非常接近。

3.2.3 Φ108mm × 15mm 钢管

取轧卡的 3 号钢管和与有限元计算初始条件接近的 4 号钢管进行分析。

3 号钢管：分段取样条件与上一个轧卡的钢管相同。每一段入口的壁厚偏差分别为 $0.174, 0.217, 0.119, 0.195, 0.216, 0.329, 0.166, 0.241\text{mm}$ 。每一段出口的壁厚偏差分别为 $0.215, 0.133, 0.413, 0.327, 0.520, 0.513, 0.309, 0.225\text{mm}$ 。有限元的计算结果为 $0.088, 0.042, 0.095, 0.203, 0.206, 0.189\text{mm}$ 。

将上述 3 组数据作图对比(见图 3)。从图中可以看出，有限元计算的结果与入口段的实测最大值和最小值出现在同一位置，而且增大和减小趋势在每一段都是一致的，因此可以认为入口段实

测值与有限元计算结果的趋势基本吻合。

4 号钢管：荒管壁厚平均值头部为 15.11mm ，尾部 15.18mm ，总平均值 15.15mm 。成品管切为 4 段，共 8 个断面，壁厚平均值分别为 $15.63, 16.17, 15.79, 16.05, 15.26, 15.10, 15.49, 15.15\text{mm}$ ，总平均值为 15.58mm 。有限元计算初始值 15.00mm ，计算结果为 15.36mm 。荒管比有限元计算初始值大 0.15mm ，成品管比有限元计算结果大 0.21mm ，这说明有限元计算结果是比较准确的。

4 结 语

为了研究钢管微张力减径的过程，用三维大变形弹塑性有限元对其稳态轧制进行了研究。同时，结合 TZ355 十二机架微张力减径机组的工业实验对几种典型品种的轧制结果进行了对比分析。用三维大变形弹塑性有限元分析钢管微张力减径的过程在国内还是第一次，它能帮助我们确定最佳工艺，减少实验消耗，缩短新品种开发周期，对推广钢管的张力减径技术有着较大的科学意义和使用价值。

采用三维大变形弹塑性有限元着重对钢管在椭圆孔型下微张力减径过程中的壁厚变化进行了计算。通过理论计算和实验分析，我们认为：有限元计算及其边界条件，各种假设条件是符合实际变形的，理论计算与实验分析的趋势基本是一致的，EPFEP3 程序对于钢管热轧过程的分析是可行的，我们将通过进一步的实验检验和修正，最终将其应用于实际设计中。

结合本文的计算和实验分析，主要得到以下结论：

- (1) 用三维大变形弹塑性有限元分析钢管微张

力减径的过程是可行的,需做进一步的工作。

(2)在微张力减径过程中,提高张力系数有助于改善钢管的壁厚不均。在椭圆孔型下,大的张力对薄壁管的改善程度好于厚壁管。

(3)在微张力减径过程中,孔型的中部壁厚值最大,随着张力的增加,有形成内六角的趋势。

(4)张力的建立和降落应该缓慢,否则,壁厚会剧烈波动,影响钢管的质量。

(5)在无张力的情况下,钢管通过轧辊底部时减壁,通过轧辊辊缝时增壁,薄壁管壁厚变化的波动幅度大于厚壁管。

(收稿日期:2000-06-29)

● 信息

全国钢标准化技术委员会钢管分技术委员会 2000 年年会在广州召开

全国钢标准化技术委员会钢管分技术委员会(以下简称“钢管分委会”)2000年年会于2000年11月7~9日在广州番禺召开,全国钢标准化技术委员会、钢管分委会和钢管用户共15个单位17名代表参加了会议。

会议对钢管分委会章程进行了修改,同时宣读了国家质量技术监督局“质监标函(2000)169号”文《关于同意全国钢标准化技术委员会钢管分技术委员会换届及其组成方案的批复》,并向第二届钢管分委会委员颁发了国家质量技术监督局的聘书。

第二届钢管分委会主任委员成海涛同志代表第一届钢管分委会对第一届工作进行了总结,并对第二届钢管分委会的工作提出了初步打算:①深化钢管标准化改革;②完善钢管标准体系表;③组织清理钢管标准工作,提出钢管标准今后几年的制(修)订项目,其中2001年计划完成《结构用不锈钢无缝钢管》、《流体输送用不锈钢无缝钢管》、《机械结构和装饰用不锈钢焊接钢管》、《柴油机用高压无缝钢管》、《一般结构用高强度耐候焊接钢管》5个标准报批稿;2002年计划完成《低温用无缝钢管》、《不锈钢/碳素钢复合钢管》2个标准报批稿。

与会代表审定了《低压流体输送用焊接钢管》国家标准且提出了修订意见,一致同意按会议提出的审定意见修改后,将标准报批稿上报审批,该标准为推荐性国家标准,国际一般水平。

第二届钢管分委会将在全国钢标准化技术委员会的领导下,进一步调研、分析现行标准与国外相关标准之间存在的差距,更好地完成制(修)订钢管标准工作,使钢管生产企业适应加入WTO的需要;加强与钢管用户的联系,使钢管标准满足市场经济的要求,逐步做到由生产型标准向贸易型标准的转变。

(全国钢标准化技术委员会钢管分委会秘书处 邬克平)

大口径钢质管道 PE(PP)涂覆机组在南京通过省级投产鉴定

由南京橡塑机械厂研制开发的大口径钢质管道 PE(PP)涂覆机组,于2000年12月16日在南京通过了由江苏省经贸委组织、南京市经委主持的新产品投产鉴定。与会专家和用户代表高度评价了该“大口径钢质管道 PE(PP)涂覆机组”,一致认为该机组驱动功率大、挤出量大、塑化质量好、涂覆均匀,可在超高压状态下实现不停机快速换网,具有多自由度适配器,更换产品规格简便;能稳定、高效、批量生产多种规格的钢质“3PE”涂覆管道,填补了国内空白,达到了国外同类产品的先进水平。

由南京橡塑机械厂开发的钢质管道涂覆机组生产的“3PE”管道,已成功地运用于国内涩、宁、兰、南、成、渝等管道工程,并将在国家“西气东输”工程中发挥重要作用。

(南京橡塑机械厂)

国务院西部开发办网站开通

<http://www.chinawest.gov.cn>
www.westchina.gov.cn